



(19)
Bundesrepublik Deutschland
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 602 13 288 T2** 2007.08.02

(12) **Übersetzung der europäischen Patentschrift**

(97) **EP 1 495 373 B1**

(21) Deutsches Aktenzeichen: **602 13 288.6**

(86) PCT-Aktenzeichen: **PCT/US02/29942**

(96) Europäisches Aktenzeichen: **02 763 679.4**

(87) PCT-Veröffentlichungs-Nr.: **WO 2003/087958**

(86) PCT-Anmeldetag: **20.09.2002**

(87) Veröffentlichungstag
der PCT-Anmeldung: **23.10.2003**

(97) Erstveröffentlichung durch das EPA: **12.01.2005**

(97) Veröffentlichungstag
der Patenterteilung beim EPA: **19.07.2006**

(47) Veröffentlichungstag im Patentblatt: **02.08.2007**

(51) Int Cl.⁸: **G05B 17/02** (2006.01)
G05B 15/02 (2006.01)

(30) Unionspriorität:

120588 10.04.2002 US

(73) Patentinhaber:

3M Innovative Properties Co., St. Paul, Minn., US

(74) Vertreter:

derzeit kein Vertreter bestellt

(84) Benannte Vertragsstaaten:

**AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB,
GR, IE, IT, LI, LU, MC, NL, PT, SE, SK, TR**

(72) Erfinder:

**BAY, S., Randy, Saint Paul, MN 55133-3427, US;
COLLINS, J., Elisa, Saint Paul, MN 55133-3427, US;
DOBBS, N., James, Saint Paul, MN 55133-3427, US**

(54) Bezeichnung: **EINDIMENSIONALE MODELLIERUNG DER HERSTELLUNG EINES MEHRSCHICHTENMATERIALS**

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach der Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents kann jedermann beim Europäischen Patentamt gegen das erteilte europäische Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch ist schriftlich einzureichen und zu begründen. Er gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist (Art. 99 (1) Europäisches Patentübereinkommen).

Die Übersetzung ist gemäß Artikel II § 3 Abs. 1 IntPatÜG 1991 vom Patentinhaber eingereicht worden. Sie wurde vom Deutschen Patent- und Markenamt inhaltlich nicht geprüft.

Beschreibung

TECHNISCHES GEBIET

[0001] Die Erfindung betrifft Computermodellierung wie beispielsweise die Computermodellierung von Herstellungsprozessen.

STAND DER TECHNIK

[0002] In einer industriellen Herstellungsumgebung kann die präzise Steuerung der Herstellungsprozesse besonders wichtig sein. Ineffektive Prozesssteuerung kann dazu führen, dass Produkte nicht den gewünschten Ertrags- und Qualitätsstufen entsprechen. Ferner können durch schlechte Prozesssteuerung die Kosten auf Grund erhöhten Rohstoffverbrauchs, höherer Laborkosten und ähnlichem wesentlich steigen. Entsprechend versuchen viele Hersteller in dem Bestreben, verbesserte Prozesssteuerung zu erzielen, Rechenmodelle oder Simulationen für Herstellungsprozesse zu entwickeln. Ein Modellierungsexperte kann zum Beispiel Rechenmodelle entwickeln, die verschiedene Werkzeuge und Modellierungstechniken verwenden. Die Modellierungstechniken können zum Beispiel Finitelementanalyse, Finitdifferenzanalyse, neuronale Netze, lineare Regression, teilweise Kleinstquadrate (PLS), Hauptkomponentenanalyse und ähnliches umfassen.

ZUSAMMENFASSUNG

[0003] Im Allgemeinen gewährleistet die Erfindung die Erstellung und Ausführung akkurater Modelle für die Herstellung komplexer, mehrschichtiger Materialien unter Verwendung eindimensionaler numerischer Techniken. Im Speziellen können die Techniken verwendet werden, um Veränderungen eines Prozessparameters in Verbindung mit dem Material, wie beispielsweise Temperatur, während des Herstellungsprozesses zu berechnen.

[0004] In einer Ausführungsform umfasst ein Verfahren das Empfangen von Segmentdaten, die einen Prozess zum Herstellen eines Materials in einen Satz von Segmenten unterteilen, der eine oder mehrere Schichten aufweist, wobei die Segmentdaten den Herstellungsprozess entlang eines Weges, der vom Material im Herstellungsprozess durchlaufen wird, und entlang einer Oberfläche von mindestens einer Komponente des Prozesses unterteilen. Die Segmentdaten können Schichten des Materials ebenso wie Schichten der Komponenten innerhalb des Prozesses definieren, die mit dem Material in Kontakt kommen können wie beispielsweise Transportrollen oder Bänder. Das Verfahren umfasst ferner das Berechnen von Werten für einen Prozessparameter durch eine Dicke der Schichten für jedes der jeweiligen Segmente als eine Funktion der Segmentdaten unter Verwendung eines eindimensionalen Modells. Eindimensionale Modellierungstechniken können zum Modellieren der Herstellung eines komplexen, mehrschichtigen Materials verwendet werden.

[0005] In einer anderen Ausführungsform umfasst ein System eine Nutzerschnittstelle zum Empfangen von Segmentdaten, die einen Herstellungsprozess (6) definieren und den Herstellungsprozess in einen Satz von Segmenten unterteilen, die Schichten aufweisen, wobei die Segmentdaten den Herstellungsprozess entlang eines Weges, der von dem Material im Herstellungsprozess durchlaufen wird, und entlang einer Oberfläche mindestens einer Komponente des Prozesses unterteilen. Das System umfasst ferner eine Rechenmaschine, um ein eindimensionales numerisches Modell auf die Segmentdaten anzuwenden, um Werte für einen Prozessparameter über eine Dicke jeder Schicht hinweg zu berechnen.

[0006] In einer anderen Ausführungsform umfasst ein computerlesbares Medium Anweisungen, um den Prozessor zu veranlassen, eine Benutzerschnittstelle für den Empfang von Daten von einem Benutzer zu präsentieren, die einen Satz von Segmenten eines Herstellungsprozesses entlang eines Weges, der von einem Material im Herstellungsprozess durchlaufen wird, und entlang einer Oberfläche von mindestens einer Komponente des Prozesses definieren, wobei die Segmentdaten eine oder mehrere Schichten für jedes der Segmente definieren. Das Medium umfasst ferner Anweisungen zum Berechnen von Werten für einen Prozessparameter über eine Dicke der Schichten der Segmente, indem ein eindimensionales numerisches Modell auf die Segmentdaten angewendet wird.

[0007] Die Erfindung kann einen oder mehrere Vorteile bieten. Zum Beispiel können wie hierin beschrieben die eindimensionalen Modellierungstechniken zum Modellieren der Herstellung eines komplexen, mehrschichtigen Materials verwendet werden. Diese Techniken können wesentlich schneller und akkurater sein als komplexere Techniken, wie beispielsweise mehrdimensionale Finitelementanalyse. Entsprechend können die Techniken offline verwendet werden, um einen Herstellungsprozess zu beschreiben oder zu modellieren, oder

sie können in eine Herstellungsumgebung integriert werden, um Echtzeitsteuerung des Herstellungsprozesses bereitzustellen.

[0008] Ferner können die Techniken auch verwendet werden, um die Herstellung jedes Materials zu modellieren, das eine Dicke aufweist, die wesentlich kleiner als seine Länge und Breite ist wie beispielsweise ein Netz, ein Film, ein Blech und ähnliches. Die Techniken können leicht auf jeden Prozessparameter angewendet werden, der durch die Dicke des Materials variieren kann wie beispielsweise Spannung, Dehnung, Aushärtungsgeschwindigkeit, Lösungsmittelanteil, Kristallinität oder ähnliches.

[0009] Die Details einer oder mehrerer Ausführungsformen der Erfindung sind in den beiliegenden Zeichnungen und der unten stehenden Beschreibung dargelegt. Weitere Eigenschaften, Aufgaben und Vorteile der Erfindung werden durch die Beschreibung und Zeichnungen und durch die Ansprüche deutlich.

KURZBESCHREIBUNG DER ZEICHNUNGEN

[0010] [Fig. 1](#) ist ein Blockdiagramm, das ein Beispielsystem darstellt, in dem Prozessmanagementsoftware eine Rechenmaschine zum Aufrufen eines eindimensionalen Modells umfasst, um Veränderungen eines Prozessparameters innerhalb eines komplexen, mehrschichtigen Materials zu berechnen.

[0011] [Fig. 2A](#) ist ein schematisches Diagramm, das einen beispielhaften Herstellungsprozess darstellt, der in mehrere Segmente unterteilt ist.

[0012] [Fig. 2B](#) ist ein schematisches Diagramm, das einen anderen beispielhaften Herstellungsprozess darstellt, der in mehrere Segmente unterteilt ist.

[0013] [Fig. 3](#) ist ein schematisches Diagramm, das ein Finitdifferenzgitter durch ein Beispielsegment darstellt, das mehrere Schichten aufweist.

[0014] [Fig. 4](#) ist ein Ablaufdiagramm, das einen beispielhaften Betriebsmodus der Prozessmanagementsoftware und der Rechenmaschine darstellt.

[0015] [Fig. 5](#) ist ein Ablaufdiagramm, das die Anwendung eindimensionaler numerischer Verfahren zur Modellierung der Herstellung eines komplexen, mehrschichtigen Materials darstellt.

[0016] [Fig. 6](#) stellt ein Beispielfenster dar, das durch eine Benutzerschnittstelle gezeigt wird, mit der ein Benutzer interagiert, um einen Herstellungsprozess zu definieren, der ein oder mehrere Segmente aufweist.

[0017] [Fig. 7](#) stellt ein Beispielfenster dar, mit dem der Benutzer detailliertere Daten für ein spezielles Segment bereitstellt.

[0018] [Fig. 8](#) stellt ein Beispielfenster dar, mit dem der Benutzer zusätzliche Krümmungsdaten für eine ausgewählte Schicht bereitstellen kann.

[0019] [Fig. 9](#) stellt ein Beispielfenster zur Erfassung von Daten dar, die eine von einem sich drehenden Element bereitgestellte Schicht beschreiben.

[0020] [Fig. 10](#) stellt ein Beispielfenster zur Erfassung von Daten dar, die die Schichten des Materials beschreiben.

[0021] [Fig. 11](#) stellt ein Beispielfenster dar, mit dem der Benutzer andere Komponenten innerhalb des Herstellungsprozesses beschreibt, die den Prozessparameter, der modelliert wird, beeinflussen können.

[0022] [Fig. 12-Fig. 13](#) sind Kurven, die von der Benutzerschnittstelle erzeugt wurden und berechnete Werte für die Prozessparameter innerhalb jedes Segments gemäß den eindimensionalen numerischen Verfahren darstellen.

DETAILLIERTE BESCHREIBUNG

[0023] [Fig. 1](#) ist ein Blockdiagramm, das ein Beispielsystem **2** darstellt, in dem Prozessmanagementsoftware **4** eine Rechenmaschine zum Berechnen von Veränderungen eines Prozessparameters innerhalb eines Mate-

rials **7** während eines Herstellungsprozesses **6** veranlasst. Im Speziellen gewährleistet die Rechenmaschine **8** die Erzeugung und Ausführung akkurater Modelle für die Herstellung komplexer, mehrschichtiger Materialien unter Verwendung eindimensionaler numerischer Techniken.

[0024] Das Material **7** kann jede Anzahl unterschiedlicher Materialarten aufweisen, die eine Dicke haben, die wesentlich kleiner ist als ihre Länge und Breite. Das Material **7** kann zum Beispiel ein Netz, einen Film, ein Blech oder ähnliches aufweisen. Obwohl die Techniken hierin in Bezug auf die Modellierung von Temperaturveränderungen durch die Dicke des Materials **7** beschrieben werden, können die Techniken leicht auf andere Prozessparameter wie Spannung, Belastung, Aushärtungsgeschwindigkeit, Lösungsmittelanteil, Kristallinität und ähnliches angewendet werden.

[0025] Im Allgemeinen arbeitet eine Prozessmanagementsoftware **4** innerhalb einer Rechenumgebung, die durch eine Rechenvorrichtung wie beispielsweise eine Arbeitsstation oder spezifische Prozesssteuerhardware bereitgestellt wird. Die Prozessmanagementsoftware **4** stellt Signale **5** bereit, um den Herstellungsprozess **6** bei der Herstellung von Material **7** zu verwalten. Basierend auf berechneten Werten für einen oder mehrere Prozessparameter kann die Prozessmanagementsoftware **4** Daten, Grenzwerte, Zielebenen und andere Informationen für die Verwendung durch den Herstellungsprozess **6** steuern. Zusätzlich kann die Prozessmanagementsoftware **4** Prozessdaten **9** überwachen und aufzeichnen, die Daten enthalten können, die eine große Vielfalt von Prozessvariablen wie Temperaturen, Verarbeitungszeiten, Geschwindigkeiten, Dicken, Flussraten, Konzentrationen, Gewichte und ähnliches anzeigen.

[0026] Wie nachfolgend detailliert beschrieben erlaubt es die Benutzerschnittstelle **10** dem Benutzer **16** wie beispielsweise einem Modellierungsingenieur Segmentdaten bereitzustellen, die den Herstellungsprozess **6** in ein oder mehr einzelne Segmente unterteilt, so dass Veränderungen innerhalb des Materials **7** unter Verwendung eindimensionaler numerischer Verfahren modelliert werden können. Im Speziellen kann der Benutzer die Segmente des Herstellungsprozesses **6** entlang eines Weges, der von einem Material **7** durchlaufen wird, und entlang der Oberflächen der Komponenten innerhalb des Herstellungsprozesses **6** und gemäß einer oder mehrerer Regeln der Rechenmaschine **8** bestimmen. Der Benutzer **16** kann Segmentdaten bereitstellen, um neue Segmente zu definieren, wenn sich eine Randbedingung für mindestens eine Oberfläche des Materials verändert. Der Benutzer **16** kann zum Beispiel jedes Mal ein neues Segment definieren, wenn die Oberfläche des Materials **7** eine neue Komponente des Herstellungsprozesses **6** entlang des Weges kontaktiert wie beispielsweise ein Bad oder Transportrollen. Als ein anderes Beispiel kann der Benutzer **16** ein neues Segment des Materials **7** definieren, wenn ein zweites Material auf eine Oberfläche des Materials **7** beschichtet wird. Zusätzlich kann der Benutzer **16** ein neues Segment definieren, wenn eine Komponente des Herstellungsprozesses ein zweites Material kontaktiert oder in einer Randbedingung einer Veränderung unterliegt.

[0027] Für jedes Segment kann der Benutzer **16** verschiedene Informationen wie beispielsweise eine Durchschnittsgeschwindigkeit des Materials **7** und eine Durchschnittsdicke des Materials, Randbedingungen für eine oder mehr Oberflächen des Materials und ähnliches bereitstellen. Zusätzlich beschreiben die von dem Benutzer **16** bereitgestellten Segmentdaten alle Schichten, die in dem Material enthalten sind und die von den eindimensionalen numerischen Verfahren berücksichtigt werden müssen. Die Daten können zum Beispiel Schichten des Materials **7** selbst beschreiben, Schichten von Komponenten des Herstellungsprozesses **6** oder jede Kombination daraus. Die Daten können für jede Schicht eine Dicke, ein Material der Schicht, Anfangsbedingungen und ähnliches beschreiben.

[0028] Ferner kann der Benutzer **16** Daten bereitstellen, die jede von den definierten Schichten erfahrene Krümmung beschreiben. Im Allgemeinen beschreiben die Krümmungsdaten Winkelveränderungen an einem Oberflächenprofil für jede Schicht relativ zu dem Weg, der von dem Material **7** durchlaufen wird. Auf diese Art richten sich die Krümmungsdaten an jede Veränderung an dem Oberflächenprofil einer Schicht, wenn das Material **7** eine Richtungsänderung erfährt wie beispielsweise beim Kontaktieren einer rotierenden Komponente. Die Krümmungsdaten können zum Beispiel einen Radius eines Bogens beschreiben, der von einer Schicht durchlaufen wird. Für jede Schicht kann der Benutzer **16** einen Außendurchmesser einer von dem Material kontaktierten rotierenden Komponente, eine Position der Komponente relativ zu dem Material **7**, einen Umhüllungswinkel, einen Anfangswinkel, einen Endwinkel und ähnliches bereitstellen. Für einige Schichten spiegeln die Krümmungsdaten die Tatsache wider, dass die Schicht keine Änderung in der Richtung relativ zu dem Weg erfährt, der durchlaufen wird.

[0029] Die Rechenmaschine **8** wendet eindimensionale numerische Verfahren an, um die Auswirkungen der Krümmung auf die Veränderung in dem Prozessparameter durch die beschriebenen Schichten akkurat zu berechnen. Die Rechenmaschine **8** wendet eindimensionale numerische Verfahren an, die die Veränderungen

der Prozessparameter wie beispielsweise Veränderungen der Temperatur durch die Dicke der Schichten modellieren und die erkennen, dass andere Veränderungen wahrscheinlich durch örtliche Randeffekte in Randbedingungen der Schichten verursacht werden. Anders ausgedrückt wendet die Rechenmaschine **8** Techniken an, die erkennen, dass die Dicke jeder Schicht relativ zu den Randeffekten der Prozessparameter in dem Material **7** dominieren kann. In einer Ausführungsform wendet die Rechenmaschine **8** ein Finitdifferenzmodell an, um Werte für den Prozessparameter für einen Satz von Orten durch die Schichten zu berechnen.

[0030] Wie detailliert beschrieben verwendet die Rechenmaschine **8** in einer Ausführungsform die Krümmungsdaten, um die Veränderungen der Prozessparameter akkurater zu modellieren als in dem Fall, in dem die Krümmung der Schichten entweder geschätzt oder nicht berücksichtigt wurde. Die Rechenmaschine **8** kann zum Beispiel Verhältnisse der Dicken der Schichten zu dem Radius des Bogens berechnen, der durch die Krümmungsdaten definiert ist, und die berechneten Verhältnisse beim Anwenden des Modells verwenden. Wie unten beschrieben muss der Benutzer **16** keine Krümmungsdaten bereitstellen da die Rechenmaschine **8** in einer Ausführungsform jedes Segment als ein flaches Segment modelliert. Das Modellieren jedes Segments als ein flaches Segment kann zu weniger akkuraten Abschätzungen der Prozessveränderungen führen. Doch diese Technik kann in einigen Umgebungen ausreichend Abschätzung bereitstellen und erfordert weniger Rechenressourcen.

[0031] Basierend auf den berechneten Werten für die Prozessparameter steuert die Prozessmanagementsoftware **4** den Herstellungsprozess **6**. Zusätzlich kann die Benutzerschnittstelle **10** die berechneten Prozessparameter über die Anzeige **12** an den Benutzer **16** bereitstellen. Durch Interaktion mit der Eingabe-/Ausgabe-(I/O-)Vorrichtung **19** kann der Benutzer **16** verschiedene Eingaben an das Modell anpassen und abstimmen. Im Speziellen kann die Benutzerschnittstelle **10** wie unten dargestellt eine Reihe von I/O-Steuerungen wie Gleitschienen, Kippschalter oder Dateneingabefelder anzeigen, durch die der Benutzer **16** Krümmungsdaten, Segmentdaten, Randbedingungen und ähnliches anpassen.

[0032] Obwohl als Teil der Prozessmanagementsoftware **4** zur Bereitstellung von Echtzeitsteuerung des Herstellungsprozesses **6** dargestellt, können die Rechenmaschine **8** und die Benutzerschnittstelle leicht offline zur Modellierung des Herstellungsprozesses **6** verwendet werden. Auf diese Art müssen die Rechenmaschine **8** und die Benutzerschnittstelle **10** nicht in einer Herstellungsumgebung integriert werden.

[0033] [Fig. 2A](#) ist ein schematisches Diagramm, das eine beispielhafte Unterteilung eines Herstellungsprozesses **6** in mehrere Segmente darstellt. Im Speziellen ist ein neues Segment entlang des Weges P und entlang einer Oberfläche der Komponenten in dem Prozess **6** definiert. Zum Beispiel kann ein neues Segment definiert werden, wenn eine Randbedingung für eine Oberfläche des Materials **7** eine neue Komponente des Herstellungsprozesses **6** wie Transportrollen **18A-18D** oder Luftstrahlen **24** kontaktiert. Ein anderes Beispiel einer Veränderung der Randbedingungen ist das Aufbringen eines zweiten Materials auf der Oberfläche des Materials **7** wie das Auflegen oder Beschichten des Materials **23** auf dem Material **7** durch Andruckwalzen **22** zum Beispiel wie in einem Laminierungsprozess. Übergänge zwischen Segmenten werden in [Fig. 2A](#) durch gestrichelte Linien dargestellt.

[0034] Der Herstellungsprozess **6** ist zum Beispiel in ein erstes Segment S1 unterteilt, das an dem Ausgangspunkt des Materials **7** beginnt zum Beispiel die Aufbringung von Material **7** auf die Walze **18A** von der Modellform **20**. Das Segment S2 beginnt, wenn das Material **7** die Walze **18A** verlässt, wodurch eine Veränderung in einer Randbedingung für eine Oberfläche des Materials **7** hervorgerufen wird. Das Segment S2 endet und das Segment S3 beginnt, wenn eine führende Kante des Materials die Walze **18B** kontaktiert. Das Segment S4 beginnt an dem Punkt, an dem eine nachfolgende Kante des Materials **7** die Walze **18B** verlässt.

[0035] Auf gleiche Weise führt die Walze **18C** zwei neue Segmente S5 und S6 ein. Das Segment S7 beginnt an dem Punkt, an dem das Material **7** das Flüssigkeitsbad **21** kontaktiert. Die Walze **18D**, die sich in dem Bad **21** befindet, führt zu den Segmenten S8 und S9. Das Segment S10 beginnt an dem Punkt, an dem das Material **7** das Bad **21** verlässt. Das Segment S11 beginnt, wenn das Material **7** die Andruckwalze **22** kontaktiert. Das Segment S12 beginnt, wenn ein zusätzliches Material **23** auf dem Material **7** durch die Andruckwalze **22** aufgebracht wird.

[0036] Letztendlich beginnt das Segment **513**, wenn das Material **7** und das Material **23** die Luftströme **24** erreichen.

[0037] Zusätzlich können Segmente definiert werden, um die sich nicht kontaktierenden Abschnitte der Walzen **18** zu modellieren. So ist zum Beispiel Segment S1' definiert, um die sich nicht kontaktierenden Abschnitte

der Walze **18A** zu modellieren. Auf gleiche Weise modellieren die Segmente S3', S5', S8', S11' und S11'' jeweils die sich nicht kontaktierenden Abschnitte der Walzen **18B**, **18C**, **18D** und der Andruckwalzen **22**. Auf diese Art und Weise berücksichtigt die Rechenmaschine **8** Veränderungen in dem Prozessparameter, die auf Grund von Bedingungen der sich nicht kontaktierenden Abschnitte der Walzen auftreten können.

[0038] In einigen Situationen kann eine rotierende Komponente mehrere Segmente beeinflussen. Entsprechend können für komplexere Herstellungsprozesse ein oder mehrere Sätze zyklisch ablaufender Segmente definiert werden.

[0039] [Fig. 2B](#) ist ein schematisches Diagramm, das eine andere beispielhafte Unterteilung eines Herstellungsprozess **6** in mehrere Segmente darstellt. Im Speziellen stellt [Fig. 2B](#) zwei beispielhafte Situationen dar, in denen komplexe Sätze zyklisch ablaufender Segmente definiert werden können. Zum Beispiel bilden die Segmente S1-S8 einen Satz zyklisch ablaufender Segmente aus. Sie Segmente S1-S8 können in dem Sinn als zyklisch ablaufend betrachtet werden, dass der Prozessparameter wie beispielsweise Temperatur in dem ersten Segment, zum Beispiel S1, durch den Prozessparameter eines oder mehrerer der anderen Segmente, zum Beispiel S8, beeinflusst wird, wenn das Material **7** die Sätze von Segmenten durchläuft. Als ein anderes Beispiel kontaktiert das Material **7** ein Band, das drei Walzen umhüllt, die unterschiedliche Durchmesser aufweisen. In diesem Beispiel bilden die Segmente S11-S20 einen Satz zyklisch ablaufender Segmente aus.

[0040] [Fig. 2A](#), [Fig. 2B](#) stellen das Prinzip dar, dass die Einführung eines sich drehenden Elements in den Weg des Materials **7** zu der Definition eines oder mehrerer neuer Segmente führt. Doch neue Segmente müssen nicht notwendigerweise für Elemente definiert werden, die den Prozessparameter nicht wesentlich beeinflussen. Zum Beispiel kann die Rechenmaschine **8** die Temperaturänderungen in dem Material **7** akkurat modellieren, ohne dass neue Segmente für sich drehende Elemente, die die Temperatur des Materials **7** schnell erhöhen, definiert werden.

[0041] [Fig. 3](#) ist ein schematisches Diagramm, das ein Finitdifferenzgitter darstellt, das von der Rechenmaschine **8** durch ein Beispielsegment **26** eines Herstellungsprozesses definiert wird, der modelliert ist, mehrere Schichten **25A-25C** aufzuweisen (hierin Schichten **25**). Im Speziellen wird ein Material, das Schichten **25A**, **25B** aufweist, durch eine temperaturgesteuerte Walze **25C** bewegt. Entsprechend ist das Segment **26** definiert, drei Schichten **25A**, **25B**, **25C** (hierin Schichten **25**) aufzuweisen.

[0042] Als Reaktion auf die Segmentdaten, die das Beispielsegment **26** beschreiben, definiert die Rechenmaschine **8** das Gitter, einen Satz von Orten L_1 bis L_j (hierin Orte L) entlang einer Richtung Z aufzuweisen, die mit der Dicke der Schichten **25A**, **25B** und der Walze **25C** ausgerichtet ist. Die Orte L können ungleichmäßig beabstandet sein, um es der Rechenmaschine **8** zu erlauben, steile Messkurven des Prozessparameters nahe der Ränder der Schichten **25** zu erfassen und unterschiedlichen Abstand in den Schichten **25** zu definieren. In diesem Beispiel unterteilt die Rechenmaschine **8** die Schichten **25** des Segments **26** jeweils in fünf, drei und sieben Orte, was zu insgesamt **15** Orten führt, von denen **13** einzigartig sind.

[0043] Um Werte für einen Prozessparameter an den Orten L zu berechnen, ruft die Rechenmaschine **8** eindimensionale numerische Verfahren auf, die erkennen, dass andere Veränderungen wahrscheinlich durch örtliche Randeffekte in Randbedingungen der Schichten verursacht werden. Entsprechend kann eine Energiegleichung für Wärmeleitung durch die Schicht folgendermaßen geschrieben werden:

$$pC_p \frac{DT}{Dt} = \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + G \quad (1A)$$

[0044] Unter Verwendung der Krümmungsdaten kann die Gleichung folgendermaßen geschrieben werden:

$$pC_p \frac{DT}{Dt} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \cdot k \frac{\partial T}{\partial r} \right) + G \quad (1B)$$

wobei p , k und C_p Konstanten in jeder Schicht sind und r einen Radius eines Bogens darstellt, der von der Schicht entlang des Weges des Materials **7** durchlaufen wird. Wie in [Fig. 3](#) dargestellt kann r als ein Radius zu einem Außendurchmesser r_{od} einer sich drehenden Komponente spezifiziert werden. Die untenstehenden numerischen Verfahren beschreiben eine neue Formulierung, die das austauschbare Lösen von (1A) und (1B) erlauben. Die Anfangsbedingungen können für jede Schicht konstant sein oder es können jedem Ort separate Werte zugewiesen werden. Den ersten und letzten Oberflächen der Schichten können auch Randbedingungen zugewiesen werden, die aus verschiedenen Möglichkeiten ausgewählt werden können: eine konstante Ober-

flächentemperatur, Konvektion oder Graukörperstrahlung.

$$T_{\text{surface}} = T_{\text{wall}} \quad (2)$$

$$q = h(T_{\text{surface}} - T_{\infty}) \quad (3)$$

$$q = \varepsilon \sigma (T_{\text{surface}}^4 - T_{\infty}^4) \quad (4)$$

[0045] In diesen Ausdrücken ist h der Konvektionskoeffizient, T_{∞} ist die Temperatur der Umgebungen, ε ist Emissionsvermögen und σ ist die Boltzman-Konstante. Eine konstante Randbedingung der Oberflächentemperatur ist in der Tat als Konvektion umgesetzt, wobei der Konvektionskoeffizient für jeden Zeitschritt intern berechnet wird, um eine konstante Oberflächentemperatur sicherzustellen. Folgende sind typische Wert für h :

Tabelle 1

Ruheraumluft	8 W/m ² K
Parallelluftstrom	30 W/m ² K
Luftzusammenstoß	100 W/m ² K
Unruhiges Wasser	1000 W/m ² K

[0046] In einigen Heizungsarten wird Strahlung sowohl durch den Film intern als auch an der Oberfläche absorbiert. Wenn Strahlung mit der Intensität I_s (Leistung pro Einheitsbereich) an der Oberfläche ankommt, fällt die Intensität abhängig von dem Absorptionskoeffizienten κ der Schicht exponential ab. Das kann in Einheiten reziproker Länge folgendermaßen ausgedrückt werden:

$$I = I_s e^{-\kappa z} \quad (5)$$

wobei z der Abstand von der Oberfläche der Schicht ist. Für die meisten Materialien variiert der Absorptionskoeffizient mit der Wellenlänge, so dass dieser durchschnittliche Absorptionskoeffizient mit Sorgfalt verwendet werden muss. Die Rate der Energieabsorption (pro Einheitsvolumen) an den Positionen kann folgendermaßen dargestellt werden:

$$G = I_s \kappa e^{-\kappa z} \quad (6)$$

[0047] Wie in **Fig. 3** dargestellt verwenden die Techniken ein Finitdifferenzgitter durch die Schichten **25**. Orte können in der z -Richtung von $j = 1$ bis j_{max} nummeriert werden und können Koordinaten aufweisen, die als z_j und r_j geschrieben werden. Die Techniken verwenden einen Lagrangeschen Ansatz, der die z_j Koordinaten mit dem Material **7** bewegt, wenn die Berechnungen durch ein Segment gehen.

[0048] Unter Verwendung der Indizes j und k zum Anzeigen von z_j und t_k können die Werte der Variablen als $T_{j,k}$, $k_{j,k}$ und $(pCp)_{j,k}$ geschrieben werden. Andere Knotenmengen werden auf ähnliche Weise geschrieben.

[0049] Die Energiegleichung erfordert einen Finitdifferenzdruck für die Leitungsgröße

$$- \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad \text{oder} \quad \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \cdot k \frac{\partial T}{\partial r} \right) -$$

auf einem gleichmäßig beabstandeten Gitter stellt $k_{j+1/2}$ die Leitfähigkeit bei der Temperatur $(T_{j+1} + T_{j-1})/2$ dar und $k_{j-1/2}$ ist ähnlich definiert. Der Ausdruck wird mit einer neuen Steuervolumenformulation folgendermaßen angenähert:

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right)_{j,k} = \frac{A_j k_{j+1/2} \frac{T_{j+1} - T_j}{z_{j+1} - z_j} - A_{j-1} k_{j-1/2} \frac{T_j - T_{j-1}}{z_j - z_{j-1}}}{\frac{1}{2} V_j^+ (z_{j+1} - z_j) + \frac{1}{2} V_j^- (z_j - z_{j-1})} \quad (7a)$$

wobei drei neue Mengen eingeführt werden, die den relativen Knotenbereich und elementare Volumen darstel-

len:

$$A_j = 1, \text{ wenn eine Schicht flach ist, doch } A_j = \frac{r_{j+1} + r_j}{r_{OD}},$$

wenn sie gekrümmt ist

(8a)

$$V_j^+ = 1, \text{ wenn eine Schicht flach ist, doch } V_j^+ = \frac{r_{j+1} + 3r_j}{4r_{OD}},$$

wenn sie gekrümmt ist, und

(8b)

$$V_j^- = 1, \text{ wenn eine Schicht flach ist, doch } V_j^- = \frac{r_{j-1} + 3r_j}{4r_{OD}},$$

wenn sie gekrümmt ist

(8c)

[0050] Es ist zu beachten, dass (7a) in Bezug auf Positionsunterschiede geschrieben ist, so dass z_j und r_j in der Gleichung austauschbar sind (zum Beispiel $z_j - z_{j-1} = r_j - r_{j-1}$). Auf diese Art kann das Ziel des nahtlosen Kombinierens gekrümmter und flacher Schichten in einem Satz der Gleichungen erreicht werden. Entsprechend kann die Rechenmaschine **8** in einer Ausführungsform, in der der Benutzer **16** keine Krümmungsdaten bereitstellt, jedes Segment leicht als flaches Segment modellieren, das heißt indem sie $A_j = 1$, $V_j^+ = 1$ und $V_j^- = 1$ setzt. Auf diese Art und Weise kann (7a) zur Modellierung jedes Segments als flaches Segment folgendermaßen geschrieben werden:

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right)_{j,k} = \frac{\frac{k_{j+1/2} T_{j+1}}{z_{j+1} - z_j} - \frac{k_{j+1/2} T_j}{z_{j+1} - z_j} - \frac{k_{j-1/2} T_j}{z_j - z_{j-1}} + \frac{k_{j-1/2} T_{j-1}}{z_j - z_{j-1}}}{\frac{1}{2}(z_{j+1} - z_{j-1})} \quad (7b)$$

[0051] Da die Leitfähigkeitswerte zwischen den Orten eingeschätzt werden können, muss an den Schnittstellen keine durchschnittliche Leitfähigkeit berechnet werden. Die Energiegleichung verwendet eine vollkommen implizite Behandlung der Zeitableitung. Mit diesen Eigenschaften wird die Energiegleichung

$$(\rho C_p)_j \left[\frac{T_{j,k} - T_{j,k-1}}{Dt} \right] = \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right)_{j,k} + G_j \quad (9)$$

[0052] An den Schnittstellen kann der durchschnittliche Wert von $(\rho C_p)_j$ demnach folgendermaßen berechnet werden:

$$(\rho C_p)_j = \frac{(\rho C_p)_{j+1/2} \frac{1}{2} V_j^+ (z_{j+1} - z_j) + (\rho C_p)_{j-1/2} \frac{1}{2} V_j^- (z_j - z_{j-1})}{\frac{1}{2} V_j^+ (z_{j+1} - z_j) + \frac{1}{2} V_j^- (z_j - z_{j-1})} \quad (10)$$

[0053] Es kann auch eine weitere Schnittstellenbedingung in Betracht gezogen werden. Wenn zwei Schichten zusammen gebracht werden, kann die Oberflächentemperatur ermittelt werden, so dass die Gesamtenergie erhalten wird. Für zwei Schichten a und b kann diese durchschnittliche Kontakttemperatur folgendermaßen geschrieben werden:

$$T_{contact,j} = \frac{(\rho C_p)_{j+1/2} \frac{1}{2} V_j^+ (z_{j+1} - z_j) T_{a,j} + (\rho C_p)_{j-1/2} \frac{1}{2} V_j^- (z_j - z_{j-1}) T_{b,j}}{(\rho C_p)_{j+1/2} \frac{1}{2} V_j^+ (z_{j+1} - z_j) + (\rho C_p)_{j-1/2} \frac{1}{2} V_j^- (z_j - z_{j-1})} \quad (11)$$

[0054] Die Gleichung (7a) kann dann durch die Leitungsgröße ersetzt werden. Wärmeerzeugung kann entweder von der unteren oder oberen Oberfläche der Schicht oder beiden auftreten und kann folgendermaßen modelliert werden:

$$G_j = \frac{I_{bottom_surface}}{\frac{1}{2}(z_{j+1} - z_{j-1})} \left[e^{-\frac{1}{2}\kappa(z_j + z_{j-1})} - e^{-\frac{1}{2}\kappa(z_{j+1} + z_j)} \right] \quad (12)$$

$$G_j = \frac{I_{top_surface}}{\frac{1}{2}(z_{j+1} - z_{j-1})} \left[e^{-\frac{1}{2}\kappa(z_{j\max}^2 - z_{j+1} - z_j)} - e^{-\frac{1}{2}\kappa(z_{j\max}^2 - z_j - z_{j-1})} \right] \quad (13)$$

[0055] An den Oberflächen können diese Ausdrücke abgeändert werden, um die Randbedingungen einzuschließen:

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right)_{j=1,k} = \frac{A_j k_{j+1/2} \frac{T_{j+1} - T_j}{z_{j+1} - z_j} - h(T_j - T_\infty)}{\frac{1}{2} V_j^+ (z_{j+1} - z_j)} \quad (14)$$

$$G_{j=1} = \frac{G_{bottom_surface}}{z_{j+1} - z_j} \left[1 - e^{-\frac{1}{2}\kappa(z_{j+1} + z_j)} \right] \quad (15)$$

[0056] Ähnliche Anpassungen können für die letzte Oberfläche ($j = j_{\max}$) vorgenommen werden. Wenn Graukörperstrahlung erwünscht ist, wird aus (14)

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right)_{j=1,k} = \frac{A_j k_{j+1/2} \frac{T_{j+1} - T_j}{z_{j+1} - z_j} - \varepsilon \sigma (T_j^4 - T_\infty^4)}{\frac{1}{2} V_j^+ (z_{j+1} - z_j)} \quad (16a)$$

[0057] Um jedes Segment als flaches Segment zu modellieren, kann (16a) folgendermaßen geschrieben werden:

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right)_{j=1,k} = \frac{\frac{k_{j+1/2} T_{j+1}}{z_{j+1} - z_j} - \frac{k_{j+1/2} T_j}{z_{j+1} - z_j} - \varepsilon \sigma (T_j^4 - T_\infty^4)}{\frac{1}{2} (z_{j+1} - z_j)} \quad (16b)$$

[0058] Eine konstante Temperaturrandbedingung kann in ähnlicher Art und Weise wie (14) umgesetzt werden, doch der Konvektionskoeffizient ist ausreichend groß berechnet, um eine örtliche Biot-Zahl von 300: $h = 300 \text{sg}(\text{kpCp}/\Delta t)$ zu ergeben.

[0059] Die Gesamtenergieänderung jeder Schicht für ein Segment kann durch Vergleichen des Wärmeinhalts am Anfang und am Ende des Segments berechnet werden. Der Oberflächenwärmeübergang wird am Ende jedes Schritts in einem Segment berechnet. Entsprechend kann die Rechenmaschine **8** die oben beschriebenen eindimensionalen numerischen Techniken aufrufen, um Werte für einen Prozessparameter durch die Schichten akkurat zu berechnen. Auf diese Art kann die Rechenmaschine **8** die Herstellung komplexer, mehrschichtiger Materialien akkurat modellieren.

[0060] **Fig. 4** ist ein Ablaufdiagramm, das einen beispielhaften Betriebsmodus der Prozessmanagementsoftware **4** und im Speziellen der Rechenmaschine **8** zur Anwendung der oben beschriebenen numerischen Techniken darstellt. Zunächst empfängt die Rechenmaschine **8** Segmentdaten von der Benutzerschnittstelle **10** (**30**). Die Segmentdaten unterteilen den Herstellungsprozess **6** derart in ein oder mehrere einzelne Segmente, dass Veränderungen in dem Material **7** unter Verwendung eindimensionaler numerischer Verfahren wie oben beschrieben modelliert werden können. Für jedes Segment beschreiben die Segmentdaten eine Reihe von Informationen einschließlich Segmenttyp, Segmentname, durchschnittliche Leitungsgeschwindigkeit, durchschnittliche Leitungsbreite, Temperatur über dem Segment, Konvektionskoeffizient über dem Segment, Tem-

peratur unter dem Segment, Konvektionskoeffizient unter dem Segment und Länge des Segments. Ferner beschreiben die Segmentdaten alle Schichten, die in dem Material enthalten sind und die von den eindimensionalen numerischen Verfahren berücksichtigt werden müssen. Die Segmentdaten können zum Beispiel eine oder mehr Schichten des Materials ebenso wie Schichten definieren, die von Herstellungselementen eingeführt wurden, die das Material kontaktieren können wie beispielsweise Walzen.

[0061] Zusätzlich kann die Rechenmaschine Daten empfangen, die eine durch die Segmentdaten (**32**) an den Schichten eingeführte Krümmung beschreiben. Wenn bereitgestellt, beschreiben die Krümmungsdaten Winkelveränderungen an einem Oberflächenprofil für jede Schicht relativ zu dem Weg, der von dem Material **7** durchlaufen wird. Die Krümmungsdaten können zum Beispiel einen Radius eines Bogens beschreiben, der von einer Schicht durchlaufen wird. Für jede Schicht kann der Benutzer **16** einen Außendurchmesser einer von dem Material kontaktierten rotierenden Komponente, eine Position der Komponente relativ zu dem Material **7**, einen Umhüllungswinkel, einen Anfangswinkel, einen Endwinkel und ähnliches bereitstellen. Für einige Schichten spiegeln die Krümmungsdaten die Tatsache wider, dass die Schicht keine Änderung in der Richtung relativ zu dem Weg erfährt, der durchlaufen wird. Die folgenden beispielhaften Segmentdaten und Krümmungsdaten definieren zwei Segmente S1, S2. Das erste Segment führt eine einzelne Schicht für das Material ein, zum Beispiel eine Polyesterschmelze, während das zweite Segment eine Schicht für ein Gießrad einführt, das die Polyesterschmelze trägt. Die Krümmungsdaten für das Gießrad beschreiben den Außendurchmesser des Rads ebenso wie den Umhüllungswinkel für das Rad.

SEGMENT 1

TYP:	SPANNE
NAME:	VORHANG
DURCHSCHNITTliche	
LEITUNGSGESCHWINDIGKEIT:	13,7M/MIN
DURCHSCHNITTliche	
LEITUNGSBREITE	0,747 M
TEMPERATUR DARÜBER:	23 C
KONVEKTIONSKOEFFIZIENT	
DARÜBER:	10 W/M ²
TEMPERATUR DARUNTER:	23 C
KONVEKTIONSKOEFFIZIENT	
DARUNTER:	10 W/M ²
AUSGABEPUNKTE:	19
LÄNGE:	0,05 M
SCHICHT 1:	
NAME:	SCHEIBE
DICKE:	2,3 MM
ANFANGSTEMPERATUR:	302 C
MATERIAL:	POLYESTERSCHMELZE

SEGMENT 2

TYP:	WALZE
WALZENPOSITION:	DARUNTER
NAME:	GISSWALZE
DURCHSCHNITTliche	
LEITUNGSGESCHWINDIGKEIT:	13,7M/MIN
DURCHSCHNITTliche	
LEITUNGSBREITE	0,747 M
TEMPERATUR DARÜBER:	23 C
KONVEKTIONSKOEFFIZIENT	
DARÜBER:	10 W/M ²
TEMPERATUR DARUNTER:	35 C
KONVEKTIONSKOEFFIZIENT	
DARUNTER:	1000W/M ²

AUSGABEPUNKTE:	19
AUSSENDURCHMESSER:	1,0 M
UMHÜLLUNGSWINKEL:	90 GRAD
WALZENSCHICHTEN:	1
SCHICHT 1:	
NAME:	HÜLLE
DICKE:	15,2 MM
ANFANGSTEMPERATUR:	35 C
MATERIAL:	STAHL

[0062] Nach dem Empfangen der Segmentdaten und Krümmungsdaten wie beispielsweise die oben dargestellten Daten ruft die Rechenmaschine **8** eindimensionale Techniken zur akkuraten Berechnung der Werte für einen Prozessparameter durch die Dicke definierter Schichten auf Basis der Segmentdaten und der Krümmungsdaten für die Schichten auf (**34**). Wie beschrieben kann die Rechenmaschine oben beschriebene numerische Verfahren aufrufen, die Krümmungsdaten verwenden, oder sie kann numerische Verfahren aufrufen, die jedes Segment als flaches Segment modellieren.

[0063] Die Benutzerschnittstelle **10** kann die berechneten Werte dem Benutzer anzeigen (**36**). Zusätzlich kann die Prozessmanagementsoftware **4** den Herstellungsprozess **6** gemäß den berechneten Werten für die Segmente steuern (**38**), zum Beispiel durch Steuern der Geschwindigkeit, des Drucks, Volumens oder der Flussrate des Materials **7**.

[0064] [Fig. 5](#) ist ein Ablaufdiagramm, das die Anwendung eindimensionaler numerischer Verfahren zur Modellierung der Herstellung eines komplexen, mehrschichtigen Materials darstellt. Zunächst empfängt die Rechenmaschine **8** Anfangsbedingungen für den Herstellungsprozess (**40**). Zum Beispiel kann der Benutzer **16** Anfangseingabetemperaturen für die Orte bereitstellen, die in einem ersten Segment des Satzes von Segmenten definiert sind. Die Rechenmaschine **8** initialisiert das Modell durch Setzen eines Eingabevektors auf Basis der Anfangsbedingungen, die von dem Benutzer **16** bereitgestellt werden (**42**), und durch Setzen eines aktuellen Segmentzählers auf das erste Segment (**44**).

[0065] Als nächstes ruft die Rechenmaschine **8** das eindimensionale Modell auf, um einen Ausgabevektor vorhergesehener Werte des Prozessparameters wie Temperatur durch die Schichten zu berechnen, die für das aktuelle Segment definiert wurden (**46**). Wie oben beschrieben kann die Rechenmaschine **8** einen eindimensionalen Finitdifferenz Ausdruck aufrufen, um Werte an einem Gitter der Orte durch die Schichten zu berechnen.

[0066] Nach dem Berechnen des Ausgabevektors der Werte kann die Rechenmaschine **8** stabile Zustandswerte durch Bestimmen berechnen, ob die Segmentdaten für das aktuelle Segment ein Endsegment für einen Satz zyklisch auftretender Segmente definieren (**48**). Wenn ja, bestimmt die Rechenmaschine **8**, ob die Beendigungskriterien für den Satz erfüllt wurden (**50**). Wenn nicht, setzt die Rechenmaschine **8** das aktuelle Segment auf das erste Segment in dem Satz (**51**) und setzt den Eingabevektor auf Basis des Ausgabevektors (**52**). Die Rechenmaschine **8** ruft das Modell wiederholt auf, bis die Beendigungskriterien erfüllt wurden. Zum Beispiel kann die Rechenmaschine **8** bestimmen, ob Änderungen in den vorhergesehenen Werten zwischen Wiederholungen unter einen vorgegebenen Grenzwert gefallen sind. Als ein weiteres Beispiel kann die Rechenmaschine bei der Modellierung der Temperaturveränderungen durch die Schichten bestimmen, ob die Gesamtwärme, die die sich drehende Komponente verlässt, innerhalb eines vorgegebenen Grenzwerts einer in die sich drehende Komponente eindringenden Gesamtwärme liegt.

[0067] Wenn die Beendigungskriterien erfüllt wurden (Ja-Zweig bei **50**) oder wenn das Segment nicht das Endsegment in einem Zyklus von Segmenten ist (Nein-Zweig bei **48**), bestimmt die Rechenmaschine **8**, ob alle Segmente modelliert wurden (**54**). Wenn nicht, setzt die Rechenmaschine **8** den Eingabevektor für das nächste Segment auf Basis des Ausgabevektors des aktuellen Segments (**56**) und aktualisiert dann den aktuellen Segmentzähler entlang des Weges (**58**). Die Rechenmaschine **8** wiederholt die Modellierungstechniken für jedes Segment, bis alle Segmente modelliert wurden.

[0068] [Fig. 6](#) stellt das Beispielfenster **60** dar, das durch die Benutzerschnittstelle **10** gezeigt wird, mit der der Benutzer **16** interagiert, um einen Herstellungsprozess zu definieren, der ein oder mehrere Segmente aufweist. In dem Beispiel hat der Benutzer **16** Segmentdaten in den Eingabebereich **62** eingegeben, um den Prozess in fünf Segmente **64** zu unterteilen. Zusätzlich umfasst das Fenster **60** einen zweiten Eingabebereich **66**, mit dem der Benutzer **16** interagiert, um eine oder mehr Schichten **68** des Materials **7** zu beschreiben.

[0069] [Fig. 7](#) stellt ein Beispielfenster **70** dar, das von der Benutzerschnittstelle **10** dargestellt wird, mit der der Benutzer **16** interagiert, um detailliertere Daten für ein bestimmtes Segment bereitzustellen. In dem dargestellten Beispiel hat der Benutzer Segmentdaten für ein aktuelles Segment namens WALZE eingegeben, das ein sich drehendes Element umfasst. Die von dem Fenster **70** erfassten Segmentdaten für das sich drehende Element können eine Position des sich drehenden Elements relativ zu dem Material **7** umfassen, einen Namen für das Element, eine durchschnittliche Leitungsgeschwindigkeit und eine Breite für das Material **7** in dem Segment, die Randtemperaturen und Konvektionskoeffizienten über und unter dem Segment, eine Reihe Ausgabepunkte für das Segment und eine Länge für das Segment. Zusätzlich erfasst das Fenster **70** Segmentdaten, die alle Schichten **72** beschreiben, die von dem Segment eingeführt werden, wie beispielsweise eine Hülle des sich drehenden Elements.

[0070] Zusätzlich umfasst das Fenster **70** Eingabebereiche **74**, mit denen der Benutzer interagiert, um zusätzliche Daten bereitzustellen, die die Krümmung der Schichten relativ zu dem Weg beschreiben, der von dem Material **7** durch den Herstellungsprozess **6** durchlaufen wird. Zum Beispiel kann der Benutzer **16** Krümmungsdaten eingeben, die einen Umhüllungswinkel für eine Schicht umfassen, die einen Bogen um ein sich drehendes Element durchlaufen, einen Außendurchmesser eines sich drehenden Elements, einen Anfangswinkel für eine neue Schicht, einen Endwinkel für eine aktuelle Schicht und ähnliches. [Fig. 8](#) stellt ein Beispielfenster **80** dar, das durch eine Benutzerschnittstelle **10** dargestellt wird, wenn der Benutzer **16** die Schaltfläche ERWEITERT **76** ([Fig. 6](#)) drückt, um den Benutzer **16** bei der Bereitstellung einiger der Krümmungsdaten zu unterstützen.

[0071] [Fig. 9](#) stellt ein Beispielfenster **90**, dargestellt von einer Benutzerschnittstelle **10**, zur Erfassung von Daten dar, die eine von einem sich drehenden Element bereitgestellte Schicht beschreiben. Im Speziellen erfasst das Fenster **90** einen Namen, eine Dicke, eine Anfangstemperatur und ein Material für die Schicht. Auf ähnliche Weise stellt [Fig. 10](#) ein Beispielfenster **100**, dargestellt von einer Benutzerschnittstelle **10**, zur Erfassung von Daten dar, die Schichten des Materials **7** beschreiben. Der Benutzer kann die Schicht mit einem Anfangssegment und einem Endsegment in Verbindung setzen. Auf diese Art kann die Schicht multiple Segmente umspannend beschrieben werden.

[0072] [Fig. 11](#) stellt ein Beispielfenster **110**, dargestellt durch eine Benutzerschnittstelle **10**, dar, mit der der Benutzer **16** interagiert, um die anderen Komponenten in dem Herstellungssystem **6** zu beschreiben, die die modellierten Prozessparameter beeinflussen. In diesem Beispiel definiert der Benutzer **16** eine Wärmequelle, die Wärme parallel zu dem Fluss des Materials **7** entlang des Weges zuführt. Für diese Komponente erfasst das Fenster **110** verschiedene Daten einschließlich Lufttemperatur, Leitungsgeschwindigkeit, Luftstromgeschwindigkeit und ähnliches.

[0073] [Fig. 12](#) ist eine Kurve **130**, erzeugt von der Benutzerschnittstelle **10**, die exemplarisch berechnete Werte für den Prozessparameter durch die Dicke jeder Schicht darstellt, die von den Segmentdaten definiert werden. [Fig. 13](#) ist eine Kurve **140**, erzeugt von der Benutzerschnittstelle **10**, die Veränderungen der Prozessparameter in jedem Segment relativ zu den Finitdifferenzorten darstellt, die durch die Rechenmaschine **8** für jede Schicht definiert wurden.

Patentansprüche

1. Verfahren, aufweisend:

Empfangen von Segmentdaten, die einen Prozess zum Herstellen eines Materials (**7**) in einen Satz von Segmenten unterteilen und von jedem Segment definieren, dass es eine oder mehrere Schichten aufweist, wobei die Segmentdaten den Herstellungsprozess (**6**) entlang eines Weges, der vom Material im Herstellungsprozess durchlaufen wird, und entlang einer Oberfläche von mindestens einer Komponente des Prozesses unterteilen, und

Berechnen von Werten für einen Prozessparameter über eine Dicke der Schichten für jedes der betreffenden Segmente als eine Funktion der Segmentdaten unter Verwendung eines eindimensionalen numerischen Modells.

2. Verfahren nach Anspruch 1, ferner aufweisend:

Empfangen von Krümmungsdaten, welche eine Krümmung jeder der Schichten beschreiben, und Berechnen der Werte für den Prozessparameter als eine Funktion der Krümmungsdaten.

3. Verfahren nach Anspruch 1, wobei die Segmentdaten die Segmente auf Basis von Veränderungen von Randbedingungen für eine Oberfläche des Materials definieren.

4. Verfahren nach Anspruch 1, wobei die Segmentdaten die Segmente auf Basis von Veränderungen von Randbedingungen für die Komponente definieren.
5. Verfahren nach Anspruch 1, wobei das Berechnen der Werte ein Berechnen einer Temperaturveränderung für jedes der Segmente unter Verwendung eines eindimensionalen numerischen Modells aufweist.
6. Verfahren nach Anspruch 5, wobei das eindimensionale numerische Modell ein eindimensionales Finitdifferenzmodell aufweist.
7. Verfahren nach Anspruch 1, wobei das Material eine Dicke aufweist, die wesentlich geringer als eine Länge und eine Breite des Materials ist.
8. Verfahren nach Anspruch 1, wobei das Berechnen von Werten für einen Prozessparameter für jedes Segment ein Berechnen einer Veränderung in einem Prozessparameter, der aus einer Temperatur, einer Belastung, einer Dehnung, einer Aushärtung, einem Lösungsmittelanteil und einer Kristallinität ausgewählt wird, aufweist.
9. Verfahren nach Anspruch 3, wobei das Berechnen von Werten für einen Prozessparameter aufweist: Empfangen von Anfangsbedingungen für ein erstes der Segmente entlang des Weges; Berechnen der Werte des Prozessparameters für das erste der Segmente; und Berechnen der Werte des Prozessparameters für ein anderes der Segmente, wobei die berechneten Werte des Prozessparameters für das erste der Segmente als Anfangsbedingungen verwendet werden.
10. Verfahren nach Anspruch 1, wobei das Empfangen von Segmentdaten ein Empfangen von Segmentdaten von einem Benutzer aufweist.
11. Verfahren nach Anspruch 1, welches ferner ein automatisches Erzeugen der Segmentdaten auf Basis einer Eingabe, die von einem Benutzer empfangen wird, aufweist.
12. Verfahren nach Anspruch 1, wobei die Segmentdaten ein neues Segment aus den Segmenten definieren, wenn die Oberfläche des Materials eine neue Komponente des Herstellungsprozesses kontaktiert.
13. Verfahren nach Anspruch 1, wobei die Segmentdaten ein neues Segment definieren, wenn ein zweites Material hinzugefügt oder von der Oberfläche des Materials entfernt wird.
14. Verfahren nach Anspruch 1, wobei das Material eine Bahn, einen Film oder eine Scheibe aufweist.
15. Verfahren nach Anspruch 1, wobei das Berechnen von Werten für jedes Segment ein Berechnen eines Vektors von vorhergesagten Werten für den Prozessparameter aufweist.
16. Verfahren nach Anspruch 1, wobei das Berechnen von Werten ein Verwenden der berechneten Werte als Eingabewerte und für jedes Segment eines Satzes zyklisch ablaufender Segmente ein wiederholtes Berechnen der Werte aufweist, bis Abbruchkriterien erfüllt werden.
17. Verfahren nach Anspruch 16, wobei das wiederholte Berechnen der Werte ein wiederholtes Aufrufen des Modells aufweist, bis für das Segment die Veränderungen der Werte für die Prozessparameter unter einen vorgegebenen Schwellenwert fallen.
18. Verfahren nach Anspruch 17, wobei der Prozessparameter eine Temperatur des Materials aufweist und das wiederholte Berechnen der Werte ein wiederholtes Berechnen der Werte aufweist, bis eine berechnete Wärme, die aus der rotierenden Komponente austritt, innerhalb eines vorgegebenen Schwellenwertes einer berechneten Wärme liegt, die in die rotierende Komponente eintritt.
19. Verfahren nach Anspruch 1, wobei die Segmentdaten mindestens eine Schicht, die mit einer Komponente des Herstellungsprozesses verbunden ist, und mindestens eine Schicht, die mit dem Material verbunden ist, definieren.
20. Verfahren nach Anspruch 1, wobei das Berechnen der Werte ein Auswerten eines Finitdifferenzausdruckes für ein Gitter von Orten über die Schichten hinweg aufweist.

21. Verfahren nach Anspruch 20, wobei der Finitdifferenzausdruck aufweist:

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right)_{j,k} = \frac{A_j k_{j+1/2} \frac{T_{j+1} - T_j}{z_{j+1} - z_j} - A_{j-1} k_{j-1/2} \frac{T_j - T_{j-1}}{z_j - z_{j-1}}}{\frac{1}{2} V_j^+ (z_{j+1} - z_j) + \frac{1}{2} V_j^- (z_j - z_{j-1})}$$

wobei:

$A_j = 1$, wenn eine Schicht flach ist, aber

$$A_j = \frac{r_{j+1} + r_j}{r_{OD}},$$

wenn sie gekrümmt ist,

$V_j^+ = 1$, wenn eine Schicht flach ist, aber

$$V_j^+ = \frac{r_{j+1} + 3 r_j}{4 r_{OD}},$$

wenn sie gekrümmt ist, und

$V_j^- = 1$, wenn eine Schicht flach ist, aber

$$V_j^- = \frac{r_{j-1} + 3 r_j}{4 r_{OD}},$$

wenn sie gekrümmt ist.

22. Verfahren nach Anspruch 1, ferner ein Steuern eines Herstellungsprozesses in Übereinstimmung mit den Werten aufweisend.

23. Computerlesbares Medium, das Instruktionen aufweist, die einen Prozessor veranlassen zum: Präsentieren einer Benutzerschnittstelle (10) für den Empfang von Daten von einem Benutzer, die einen Satz von Segmenten eines Herstellungsprozesses (6) entlang eines Weges, der von einem Material (7) im Herstellungsprozess durchlaufen wird, und entlang einer Oberfläche von mindestens einer Komponente des Prozesses definieren, wobei die Segmentdaten eine oder mehrere Schichten für jedes der Segmente definieren, und Berechnen von Werten für einen Prozessparameter über Dicken der Schichten der Segmente, indem ein ein-dimensionales numerisches Modell auf die Segmentdaten angewendet wird.

24. Computerlesbares Medium nach Anspruch 23, wobei die Segmentdaten den Satz von Segmenten auf Basis von Veränderungen von Randbedingungen für eine Oberfläche des Materials definieren.

25. Computerlesbares Medium nach Anspruch 23, wobei die Segmentdaten die Segmente auf Basis von Veränderungen von Randbedingungen für die Komponente definieren.

26. Computerlesbares Medium nach Anspruch 23, wobei die Benutzerschnittstelle Eingabebereiche aufweist, um für jedes Segment Segmentdaten zu empfangen, die eine mittlere Geschwindigkeit des Materials, eine mittlere Breite des Materials und eine Randbedingung für eine Oberfläche des Materials aufweisen.

27. Computerlesbares Medium nach Anspruch 23, ferner Instruktionen aufweisend, um den Prozessor zur Präsentation der Benutzerschnittstelle zu veranlassen, um Krümmungsdaten zu empfangen, welche die Krümmung der Schichten beschreiben, und um die Werte für den Prozessparameter als eine Funktion der Krümmungsdaten zu berechnen.

28. Computerlesbares Medium nach Anspruch 27, wobei die Benutzerschnittstelle Eingabebereiche zum Empfang eines Umhüllungswinkels, eines Außendurchmessers für ein rotierendes Bauteil für einen Herstellungsprozess und einer Lage für das Bauteil bezüglich des Materials aufweist.

29. Computerlesbares Medium nach Anspruch 23, wobei die Instruktionen den Prozessor veranlassen, die berechneten Werte als Eingabewerte zu verwenden und für jedes Segment eines Satzes zyklisch ablaufender Segmente die Werte wiederholt zu berechnen, bis Abbruchkriterien erfüllt werden.

30. Computerlesbares Medium nach Anspruch 23, wobei die Segmentdaten Schichten, die mit einer Komponente des Herstellungsprozesses verbunden sind, und Schichten, die mit dem Material verbunden sind, definieren.

31. Computerlesbares Medium nach Anspruch 23, wobei die Instruktionen den Prozessor veranlassen, die Werte durch Auswerten eines Finitdifferenzausdruckes für ein Gitter von Orten über die Schichten hinweg zu berechnen.

32. Computerlesbares Medium nach Anspruch 31, wobei der Finitdifferenzausdruck aufweist:

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right)_{j,k} = \frac{A_j k_{j+1/2} \frac{T_{j+1} - T_j}{z_{j+1} - z_j} - A_{j-1} k_{j-1/2} \frac{T_j - T_{j-1}}{z_j - z_{j-1}}}{\frac{1}{2} V_j^+ (z_{j+1} - z_j) + \frac{1}{2} V_j^- (z_j - z_{j-1})}$$

wobei:

$A_j = 1$, wenn eine Schicht flach ist, aber

$$A_j = \frac{r_{j+1} + r_j}{r_{OD}},$$

wenn sie gekrümmt ist,

$V_j^+ = 1$, wenn eine Schicht flach ist, aber

$$V_j^+ = \frac{r_{j+1} + 3 r_j}{4 r_{OD}},$$

wenn sie gekrümmt ist, und

$V_j^- = 1$, wenn eine Schicht flach ist, aber

$$V_j^- = \frac{r_{j-1} + 3 r_j}{4 r_{OD}},$$

wenn sie gekrümmt ist.

33. Computerlesbares Medium nach Anspruch 23, ferner Instruktionen aufweisend, die den Prozessor zum Steuern eines Herstellungsprozesses in Übereinstimmung mit den Werten veranlassen.

34. Computerlesbares Medium nach Anspruch 23, ferner Instruktionen aufweisend, die den Prozessor veranlassen zum:

Empfangen von Anfangsbedingungen für ein erstes der Segmente entlang des Weges;

Aufrufen des eindimensionalen numerischen Modells auf Basis der Anfangsbedingungen, um Werte für einen Prozessparameter über die Schichten eines ersten der Segmente hinweg zu berechnen; und

Aufrufen des eindimensionalen numerischen Modells für jedes der verbleibenden Segmente unter Verwendung der berechneten Werte für das vorhergehende Segment entlang des Weges von jedem der Segmente als Anfangsbedingungen für das Modell.

35. Computerlesbares Medium nach Anspruch 34, wobei die Segmentdaten die Segmente auf Basis von Veränderungen von Randbedingungen für eine Oberfläche des Materials definieren.

36. Computerlesbares Medium nach Anspruch 34, wobei die Segmentdaten die Segmente auf Basis von Veränderungen von Randbedingungen für die Komponente definieren.

37. Computerlesbares Medium nach Anspruch 34, wobei das eindimensionale numerische Modell ein eindimensionales Finitdifferenzmodell aufweist.

38. Computerlesbares Medium nach Anspruch 34, wobei der Prozessparameter eine Temperatur, eine Spannung, eine Dehnung, eine Aushärtung, einen Lösungsmittelanteil oder eine Kristallinität aufweist.

39. Computerlesbares Medium nach Anspruch 34, ferner Instruktionen aufweisend, um die Segmentdaten

von einem Benutzer über eine Benutzerschnittstelle zu empfangen.

40. Computerlesbares Medium nach Anspruch 34, ferner Instruktionen aufweisend, um die Segmentdaten auf Basis einer Eingabe zu erzeugen, die von einem Benutzer empfangen wird.

41. Computerlesbares Medium nach Anspruch 34, ferner Instruktionen aufweisend, um für jedes Segment eines Satzes zyklisch ablaufender Segmente das eindimensionale numerische Modell wiederholt aufzurufen, bis Abbruchkriterien erfüllt werden.

42. Computerlesbares Medium nach Anspruch 41, ferner Instruktionen aufweisend, um das eindimensionale numerische Modell wiederholt aufzurufen, bis Veränderungen der Werte für die Prozessparameter für das Segment unter einen vorgegebenen Schwellenwert fallen.

43. Computerlesbares Medium nach Anspruch 34, ferner Instruktionen aufweisend, um das eindimensionale numerische Modell aufzurufen, indem ein Finitdifferenzsausdruck für ein Gitter von Orten, die über die Dicke des Materials ungleichförmig verteilt sind, ausgewertet wird.

44. Computerlesbares Medium nach Anspruch 41, wobei der Finitdifferenzsausdruck aufweist:

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right)_{j,k} = \frac{A_j k_{j+1/2} \frac{T_{j+1} - T_j}{z_{j+1} - z_j} - A_{j-1} k_{j-1/2} \frac{T_j - T_{j-1}}{z_j - z_{j-1}}}{\frac{1}{2} V_j^+ (z_{j+1} - z_j) + \frac{1}{2} V_j^- (z_j - z_{j-1})}$$

wobei:

$A_j = 1$, wenn eine Schicht flach ist, aber

$$A_j = \frac{r_{j+1} + r_j}{r_{OD}},$$

wenn sie gekrümmt ist,

$V_j^+ = 1$, wenn eine Schicht flach ist, aber

$$V_j^+ = \frac{r_{j+1} + 3 r_j}{4 r_{OD}},$$

wenn sie gekrümmt ist, und

$V_j^- = 1$, wenn eine Schicht flach ist, aber

$$V_j^- = \frac{r_{j-1} + 3 r_j}{4 r_{OD}},$$

wenn sie gekrümmt ist.

45. Computerlesbares Medium nach Anspruch 34, ferner Instruktionen aufweisend, um für jedes Segment einen Herstellungsprozess in Übereinstimmung mit den Werten zu steuern.

46. Computerlesbares Medium nach Anspruch 34, ferner Instruktionen aufweisend, um einem Benutzer die Werte für jedes Segment anzuzeigen.

47. Computerlesbares Medium nach Anspruch 34, wobei die Instruktionen den Prozessor veranlassen, Krümmungsdaten für die Schichten zu empfangen und die Werte für den Prozessparameter als eine Funktion der Krümmungsdaten zu berechnen.

48. System zum Berechnen von Werten für einen Prozessparameter über eine Dicke eines hergestellten Materials, wobei das System aufweist:

eine Nutzerschnittstelle (10) zum Empfangen von Segmentdaten, die einen Herstellungsprozess (6) definieren und den Herstellungsprozess in einen Satz von Segmenten unterteilen, die eine oder mehrere Schichten aufweisen, wobei die Segmentdaten den Herstellungsprozess entlang eines Weges, der vom Material (7) im Herstellungsprozess durchlaufen wird, und entlang einer Oberfläche mindestens einer Komponente des Prozes-

ses unterteilen, und eine Rechenmaschine (8), um ein eindimensionales numerisches Modell auf die Segmentdaten anzuwenden, um Werte für einen Prozessparameter über eine Dicke der Schichten hinweg zu berechnen.

49. System nach Anspruch 48, wobei die Benutzerschnittstelle Krümmungsdaten empfängt, welche die Krümmung der Schichten mit Bezug auf den Weg beschreiben, der von einem Material beim Herstellungsprozess durchlaufen wird, und die Rechenmaschine die Werte für den Prozessparameter als eine Funktion der Krümmungsdaten berechnet.

50. System nach Anspruch 48, ferner eine Prozessmanagementsoftware aufweisend, um einen Herstellungsprozess in Übereinstimmung mit den berechneten Werten zu steuern.

51. System nach Anspruch 48, wobei die Benutzerschnittstelle die berechneten Werte dem Benutzer präsentiert.

52. System nach Anspruch 48, wobei die Rechenmaschine das eindimensionale numerische Modell aufruft, um für jedes Segment einen Vektor vorhergesagter Werte für den Prozessparameter zu berechnen.

53. System nach Anspruch 48, wobei das Material eine Dicke aufweist, die weit geringer als eine Länge und eine Breite des Materials ist.

54. System nach Anspruch 48, wobei die Segmentdaten die Segmente entlang des Weges auf Basis eines Kontaktes zwischen einer Oberfläche des Materials und Komponenten des Herstellungsprozesses definieren.

55. System nach Anspruch 48, wobei die Segmentdaten die Segmente auf Basis von Veränderungen von Randbedingungen für eine Oberfläche des Materials definieren.

56. System nach Anspruch 48, wobei die Segmentdaten die Segmente auf Basis von Veränderungen von Randbedingungen für die Komponente definieren.

57. System nach Anspruch 48, wobei die Segmentdaten die Segmente entlang des Weges auf Basis der Addition oder Subtraktion von anderen Materialien zu oder von einer Oberfläche des Materials definieren.

58. System nach Anspruch 48, wobei die Rechenmaschine das eindimensionale Modell aufruft, um einen Finitdifferenzausdruck für ein Gitter von Orten, die über die Dicke des Materials hinweg ungleichförmig verteilt sind, zu berechnen.

59. System nach Anspruch 58, wobei der Finitdifferenzausdruck aufweist:

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right)_{j,k} = \frac{A_j k_{j+1/2} \frac{T_{j+1} - T_j}{z_{j+1} - z_j} - A_{j-1} k_{j-1/2} \frac{T_j - T_{j-1}}{z_j - z_{j-1}}}{\frac{1}{2} V_j^+ (z_{j+1} - z_j) + \frac{1}{2} V_j^- (z_j - z_{j-1})}$$

wobei:

$A_j = 1$, wenn eine Schicht flach ist, aber

$$A_j = \frac{r_{j+1} + r_j}{r_{OD}},$$

wenn sie gekrümmt ist,

$V_j^+ = 1$, wenn eine Schicht flach ist, aber

$$V_j^+ = \frac{r_{j+1} + 3r_j}{4r_{OD}},$$

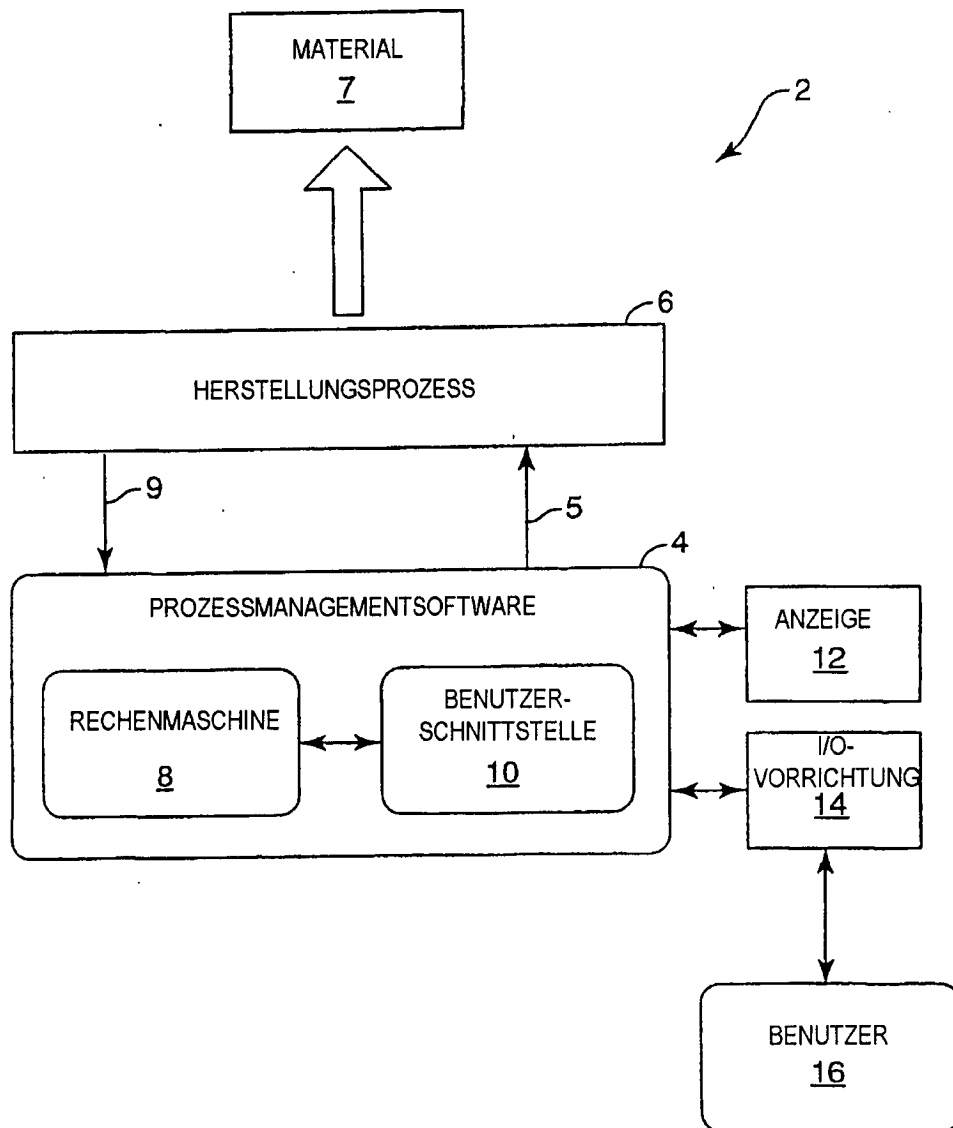
wenn sie gekrümmt ist, und

$V_j^- = 1$, wenn eine Schicht flach ist, aber

$$V_j^- = \frac{r_{j-1} + 3 r_j}{4 r_{OD}} ,$$

wenn sie gekrümmt ist.

Es folgen 12 Blatt Zeichnungen

**FIG. 1**

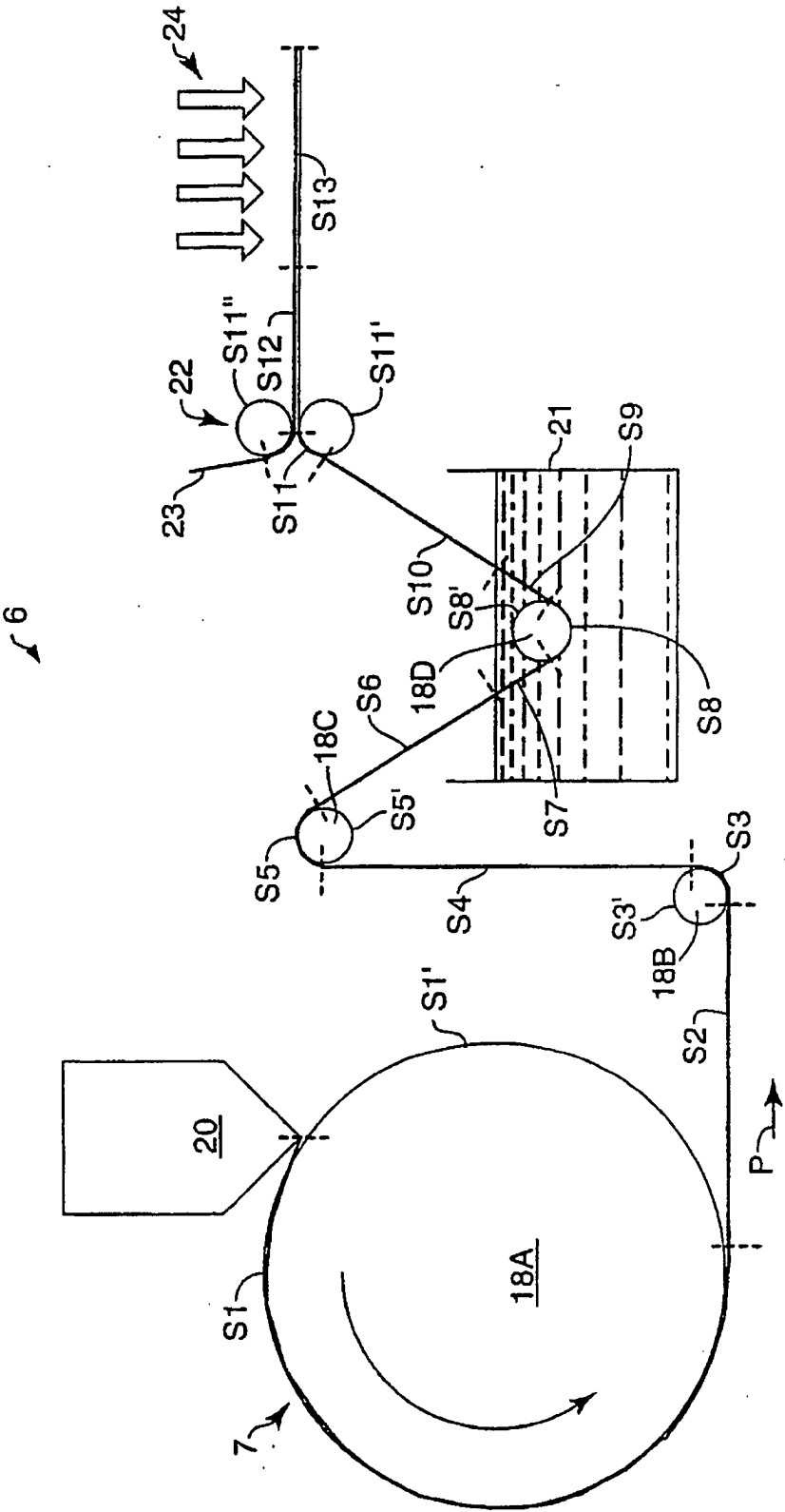


FIG. 2A

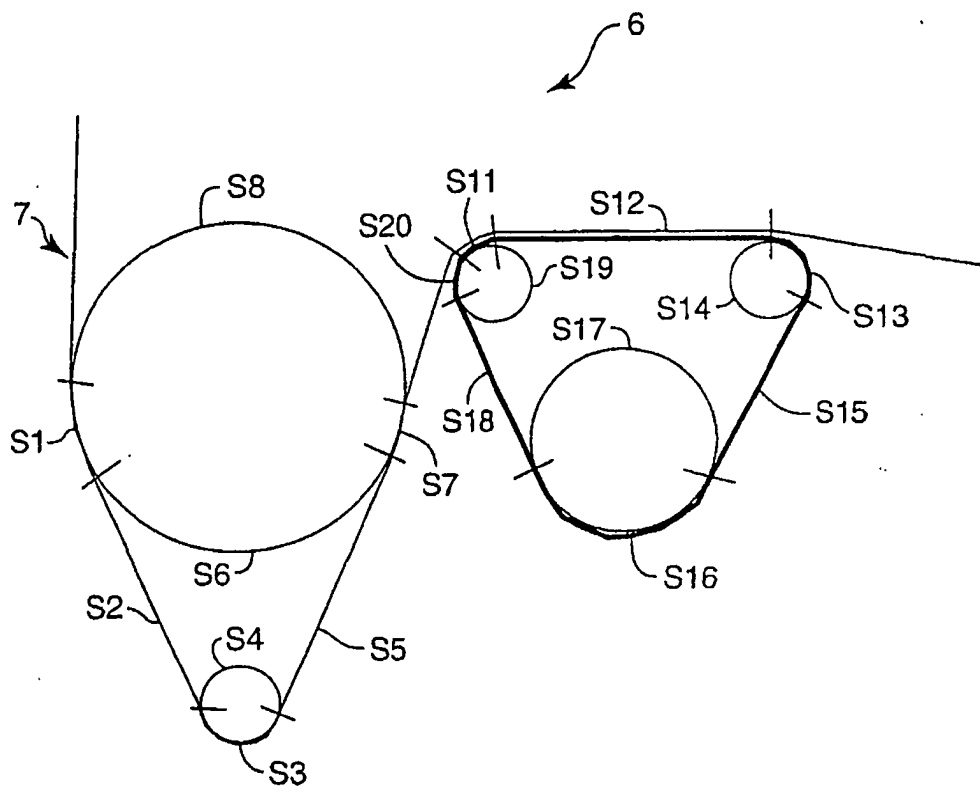


FIG. 2B

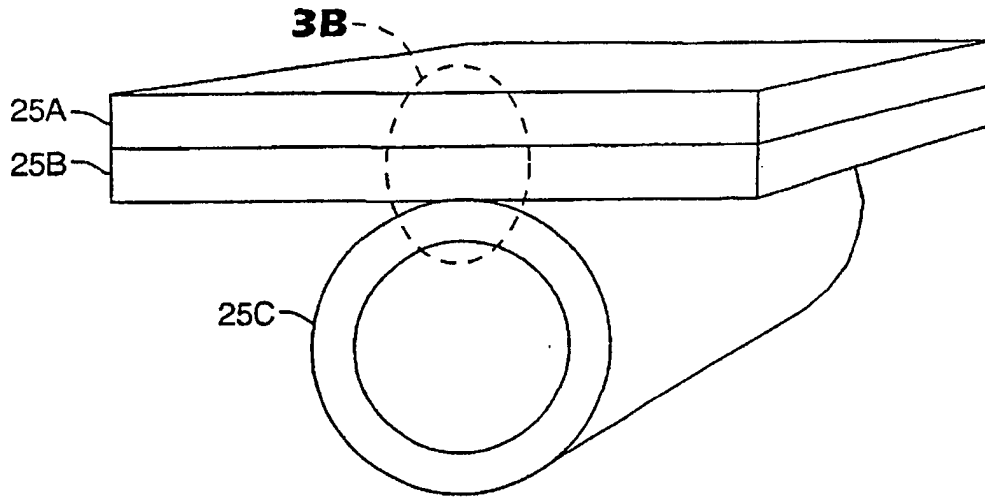


FIG. 3A

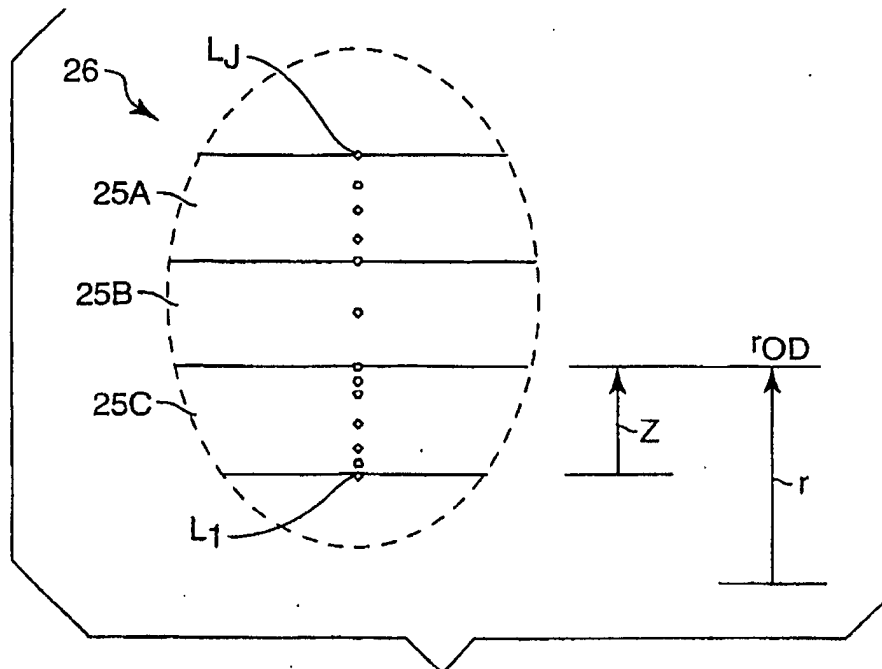


FIG. 3B

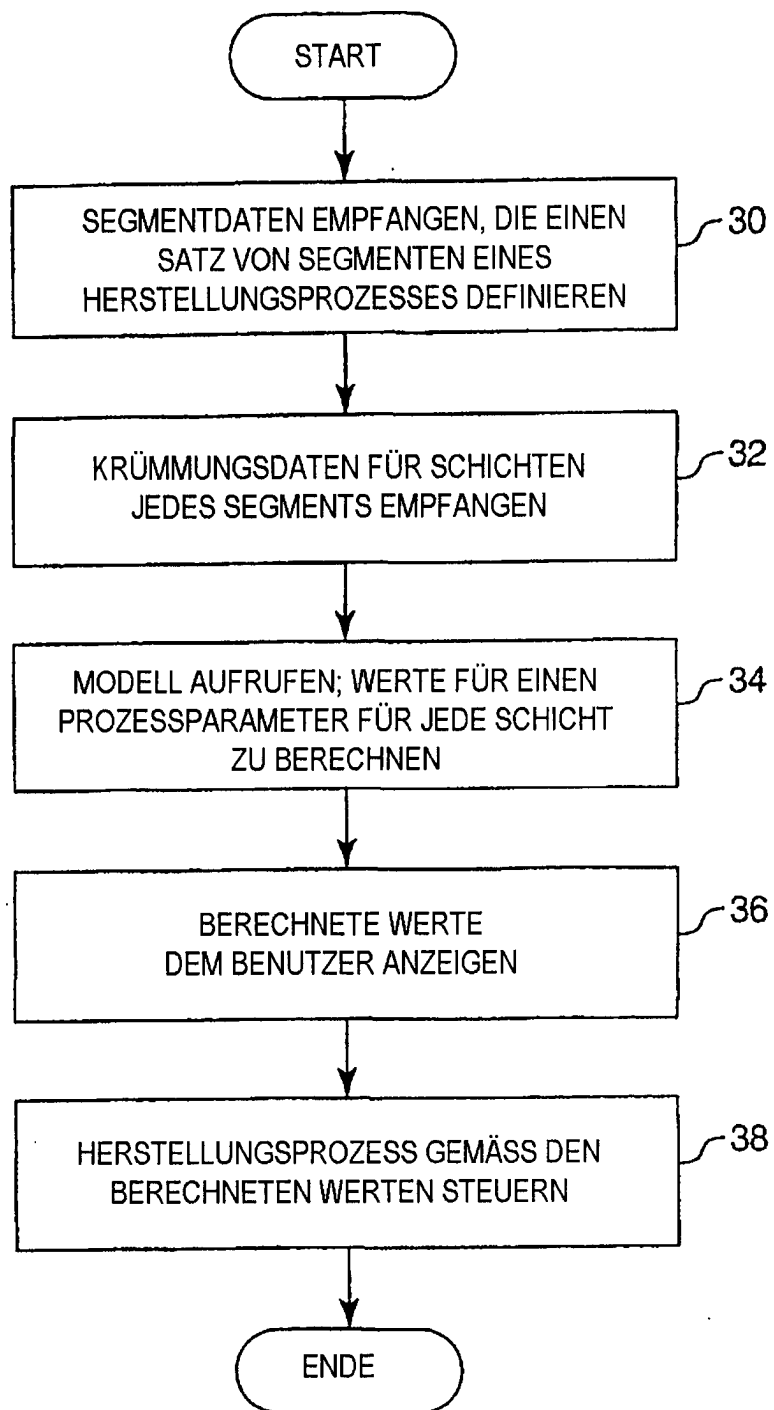
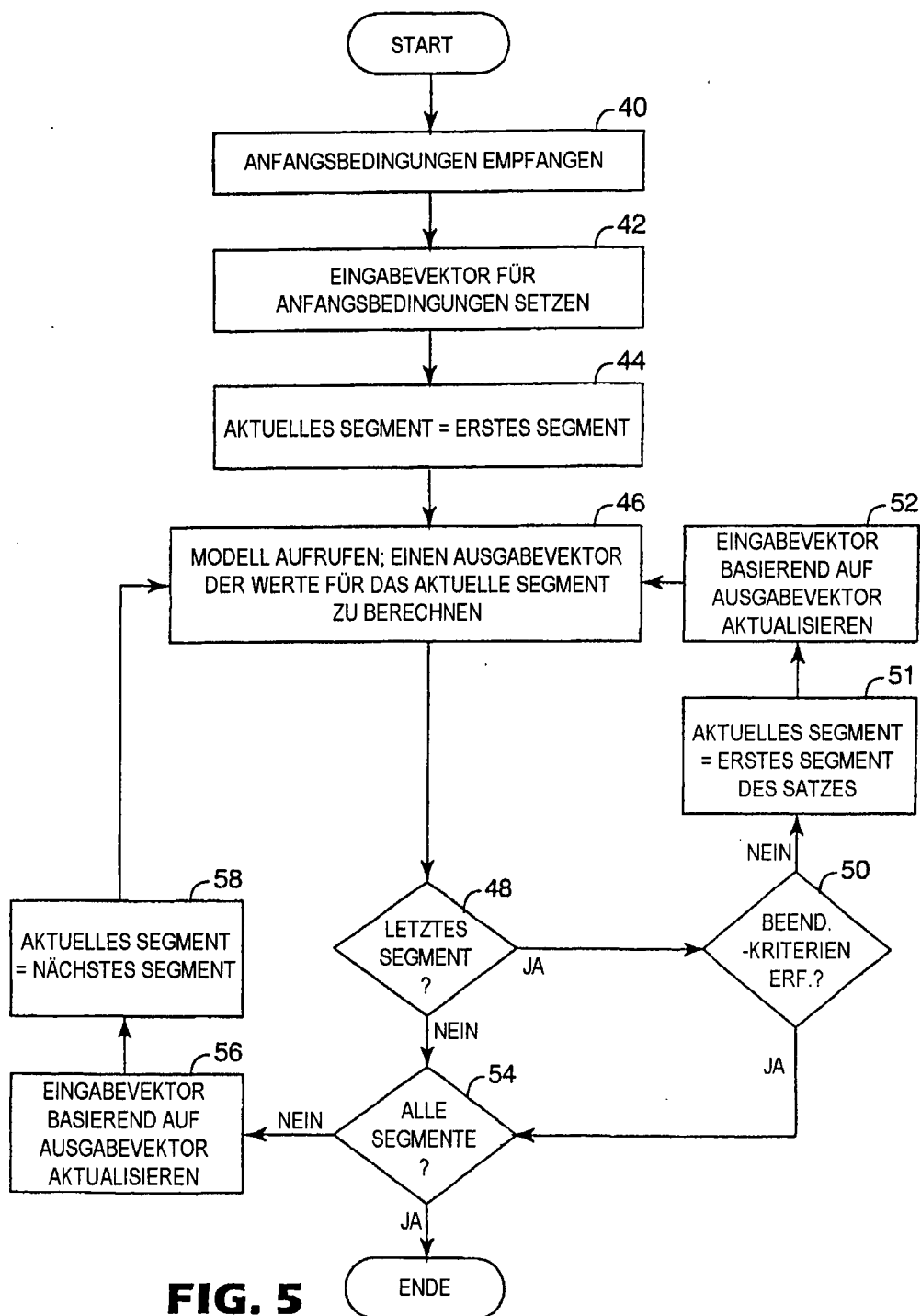
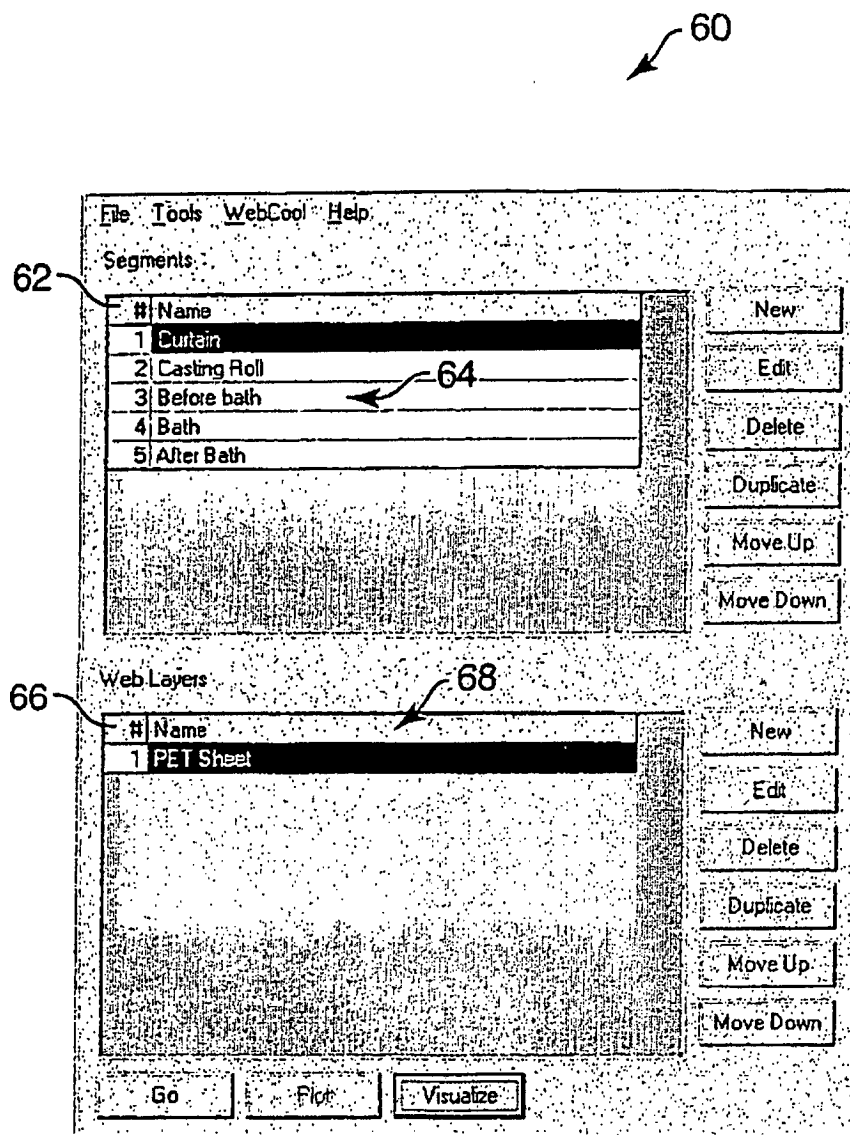


FIG. 4

**FIG. 5**

**FIG. 6**

70

Segment: Casting Roll

Kind:

Roller IS: ☒ above (or left of) web ☒ below (or right of) web

Name:

Average Line Speed (m/min):

Average Web Width (m):

Temperature [C]: Above/Left (Ambient): Below/Right (Roller):

Convection Coefficient (W/m²K): Calculate... Calculate...

Plotting Points:

Length (m):

Outside Diameter (m): 76

Wrap Angle [degrees]: Advanced... ABA: AEA:

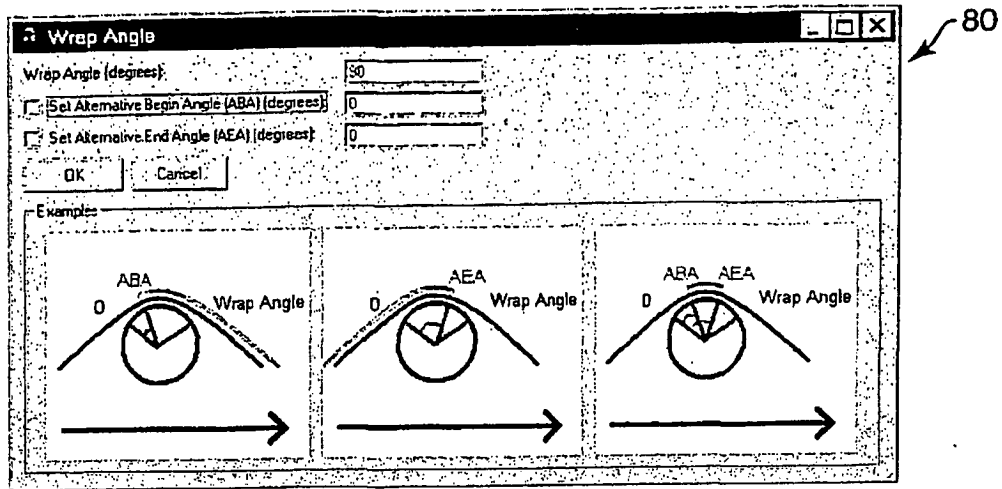
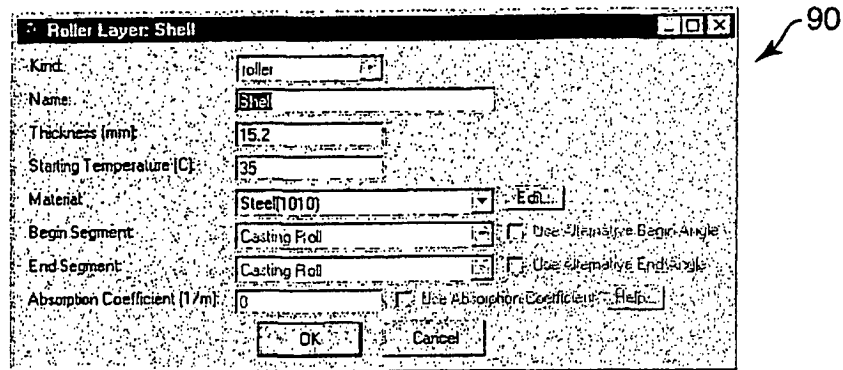
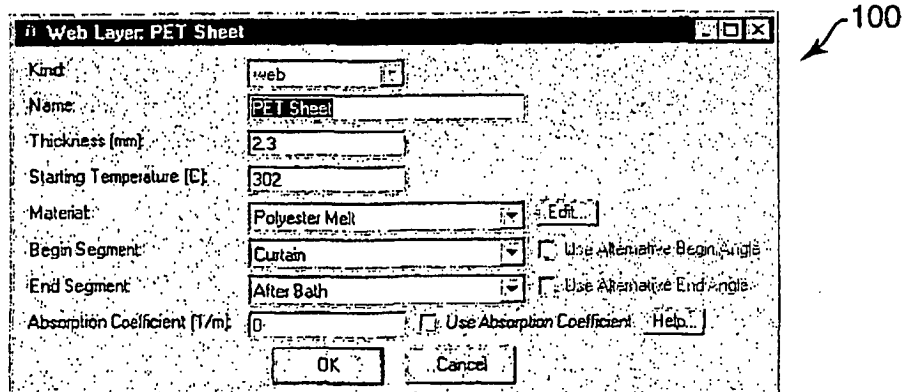
Roller Layers (outside to inside)

Roller Layer Name	Roller Layer
1 Shell	

New Edit Delete Duplicate Move Up Move Down

OK Cancel (all but layer changes)

FIG. 7

**FIG. 8****FIG. 9****FIG. 10**

110

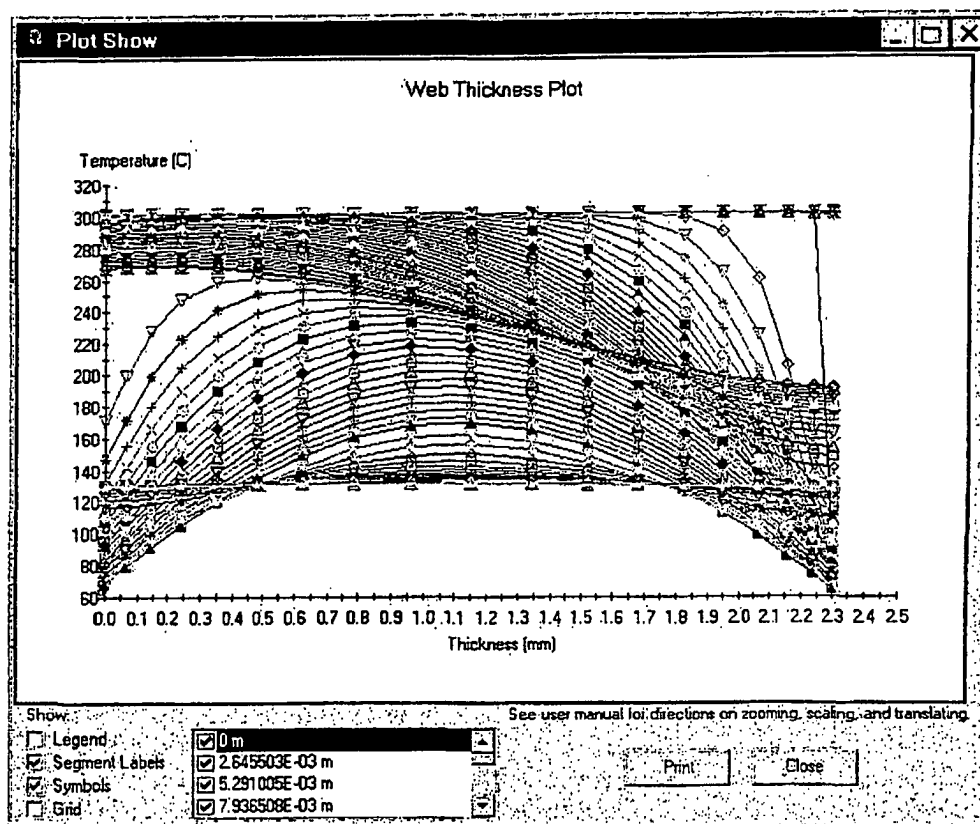
Heat Transfer

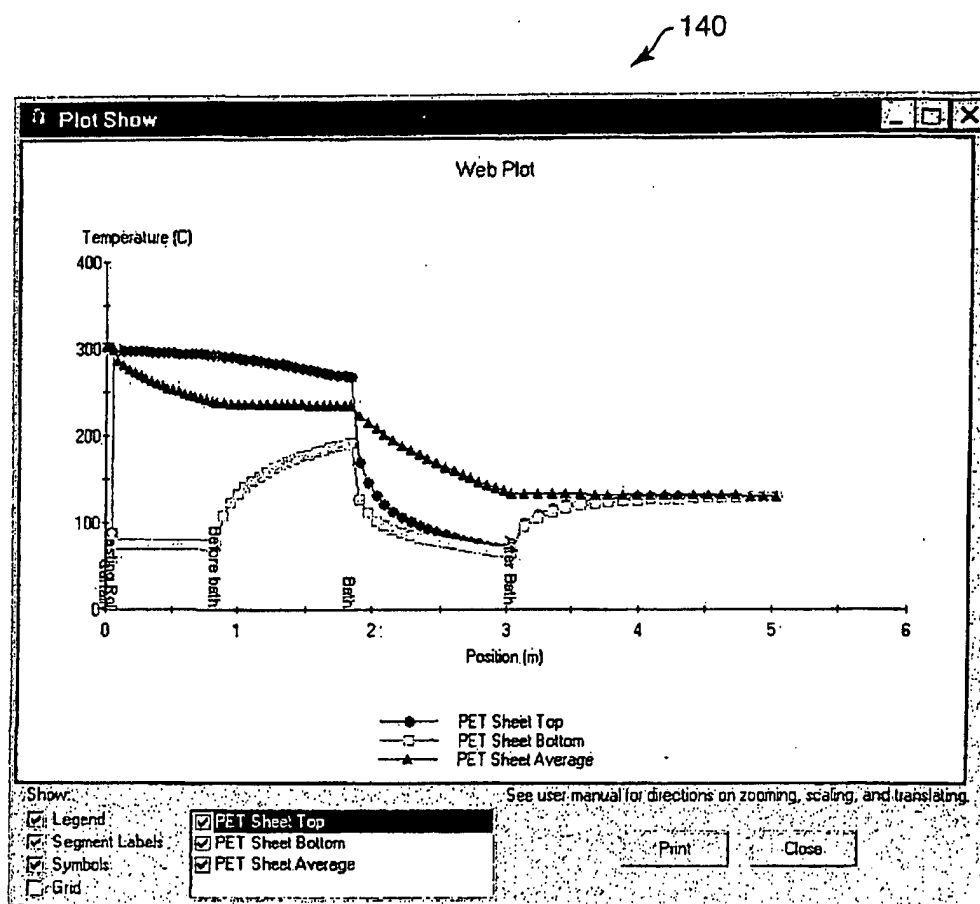
Nozzle Type:	Parallel Flow
Air Temperature (C):	23
Line Speed (m/min):	13.7
Air Velocity (m/min):	60
Hydraulic Diameter (m):	0.75
Slot Width (m):	0.009525
TEC Characteristic Length (m):	0.00274
Center-to-Center Spacing (m):	0.305
Nozzle-to-Web Spacing (m):	0.095
Nozzle Pressure Drop (in. H2O):	1.5
Hole Diameter (cm):	0.0095
Open Area Fraction:	0.015

Calculate 86 **OK** **Revert** **Cancel**

FIG. 11

130

**FIG. 12**

**FIG. 13**